冰冻圈变化及其对中国气候的影响*

秦大河[1,2] 周波涛[3] 效存德[1,4]
QIN Dahe[1,2] ZHOU Botao[3] XIAO Cunde[1,4]

1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室,兰州,730000
2. 中国气象局,北京,100081
3. 中国气象局国家气候中心,北京,100081
4. 中国气象局中国气象科学研究院,北京,100081
1. *State Key Laboratory of Cryospheric Sciences*, *Lanzhou* 730000, *China*
2. *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081, *China*
3. *National Climate Center*, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081, *China*
4. *Chinese Academy of Meteorological Sciences*, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081, *China*

2014-01-24 收稿,2014-07-07 改回.

秦大河,周波涛,效存德. 2014. 冰冻圈变化及其对中国气候的影响. 气象学报,72(5):869-879
Qin Dahe, Zhou Botao, Xiao Cunde. 2014. Progress in studies of cryospheric changes and their impacts on climate of China. *Acta Meteorologica Sinica*, 72(5): 869-879

Abstract The cryosphere is a prominent factor in and an indicator of global climate change. It serves one of the most direct and sensitive feedbacks in the climate system, and plays an important role in the earth's climate system. Cryospheric research has attracted unprecedented attention in the context of global warming, and is now one of the most active areas in studies of global change, sustainable development, and the climate system. This paper addresses recent and potential future changes in the cryosphere both globally and within China under the background of global warming. Particular attention is paid to progress toward understanding the impacts of the Tibetan Plateau and Eurasian snow cover, Arctic and Antarctic sea ice, and permafrost and glaciers on Chinese climate. The future development of cryospheric research in China is also discussed.
Key words Cryosphere, Climate effect, Climate system, Global warming

摘 要 冰冻圈是全球气候变化的显著因子和指示器,也是对气候系统影响最直接和最敏感的圈层,在地球气候系统中占据举足轻重的地位。在全球变暖背景下,冰冻圈研究受到前所未有的重视,成为气候系统研究中最活跃的领域之一;冰冻圈变化正在引起的一系列社会经济影响是当前全球变化和可持续发展最为关注的热点之一。文中给出了气候变暖背景下近几十年来全球和中国冰冻圈的变化特征,以及未来可能的变化趋势;着重从气候效应角度,综述了青藏高原和欧亚积雪、北极和南极海冰、冻土与冰川变化对中国气候影响的研究成果;并讨论了中国冰冻圈科学研究的未来发展方向。
关键词 冰冻圈,气候效应,气候系统,全球变暖
中图法分类号 P461$^+$.6, P170

1 引 言

冰冻圈是指地球表层(陆地和海洋表面及以下)水以固态形式存在的圈层,组成部分主要包括冰盖、冰川、积雪、冻土、海冰、湖冰、河冰和固态降水。目前,全球75%的淡水资源储存于冰冻圈中,陆地表

* 资助课题:国家重大科学研究计划项目(2013CBA01808)、国家自然科学基金项目(41275078)、国家科技支撑项目(2012BAC20B05)。
作者简介:秦大河,主要从事气候变化、冰冻圈与全球变化研究。E-mail:qdh@cma.gov.cn

面约10%被冰盖和冰川覆盖,海洋表面7%为海冰覆盖,北半球冬季积雪范围约占陆地的一半,冻土面积更大(IPCC,2007)。

由于冰雪的高反照率和相变潜热以及巨大的冰储量,冰冻圈在地球气候系统中发挥着极为重要的作用。冰冻圈各组分的快速变化对地表能量平衡、大气环流、海洋环流、水循环、海平面变化、碳源、碳汇乃至区域社会经济都有深远影响(秦大河等,2006)。冰雪变化通过影响能量平衡及水循环过程改变区域或全球尺度的气候动力过程进而影响气候变化;冰量变化通过改变海洋盐度和温度影响大洋环流、改变全球气候格局;多年冻土变化不仅通过改变地-气水热交换过程影响气候系统,而且还会通过改变冻土碳库影响全球碳循环和气候变化。冰冻圈变化还对海平面上升有显著贡献(IPCC,2013),近年来冰冻圈融化和海水热膨胀是海平面上升的主要贡献者(Cazenanve, et al, 2008,2009)。

中国是中低纬度地区冰冻圈最发育的国家,广泛分布的冰川、冻土和积雪具有显著的气候效应、环境效应、水资源效应和生态效应,是维系干旱区绿洲经济发展和寒区生态系统稳定的重要保障,对国家西部发展战略有重大意义(丁永建等,2009;秦大河等,2009)。

由于对气候变化的高度敏感性和重要反馈作用,在全球变暖背景下,冰冻圈研究受到前所未有的重视,成为气候系统研究中最活跃的领域之一,也是当前全球变化和可持续发展最为关注的热点之一(Allison, et al, 2001;效存德,2008;秦大河等,2009)。为此,文中介绍了全球和中国冰冻圈变化的研究新结论,回顾了冰冻圈变化对中国气候影响的研究成果,并对中国冰冻圈研究的未来方向作了展望。

2 全球冰冻圈变化

作为气候变化的指示器,全球冰冻圈近几十年来发生了显著变化。在气候变暖背景下,冰冻圈各要素几乎都处于冰量持续损失的状态。最新发布的IPCC第五次评估报告(AR5)第一工作组报告(IPCC, 2013)综合评估了全球冰冻圈的变化(图1),其结论代表了科学界在冰冻圈研究方面的最新进展和最新认知。

AR5报告指出,近20年来格陵兰冰盖和南极冰盖的冰储量一直在减少。1992—2001年,格陵兰冰盖的冰储量每年约减少34[-6—74] Gt,南极冰盖的冰储量每年约减少30[-37—97] Gt。2002年以来,格陵兰和南极冰盖冰储量减少速度明显加快,每年大约分别减少215[157—274] Gt和147[72—221] Gt。全球山地冰川普遍退缩。1971—2009年,全球山地冰川平均每年约减少226[91—361] Gt的冰体。北极海冰范围明显缩小。1979—2012年,北极海冰范围缩小速率为(3.5%—4.1%)/(10 a)。夏季缩小尤为明显,缩小速率达(9.4%—13.6%)/(10 a)。与北极海冰变化不同,1979—2012年南极海冰范围以(1.2%—1.8%)/(10 a)的速率增大,但存在显著的区域差异,有些区域在增大,有些区域在缩小。20世纪中叶以来,北半球积雪范围缩小。1967—2012年,北半球3和4月积雪范围缩小速率为1.6%/(10 a)[(0.8%—2.4%)/(10 a)],6月积雪范围缩小速率为11.7%/(10 a)[(8.8%—14.6%)/(10 a)]。自20世纪80年代初以来,大多数地区多年冻土层的温度升高。阿拉斯加北部多年冻土温度在20世纪80年代早期至21世纪最初10年的升温幅度达到3℃,俄罗斯欧洲北部在1971—2010年升高达2℃,而且多年冻土厚度和范围大幅减小。

未来随着全球气候进一步变暖,北极海冰将继续消融,全球冰川体积和北半球春季积雪范围以及多年冻土范围也将缩小。预估结果表明,至21世纪末,北极海冰范围在9月将减少43%—94%,在2月将减少8%—34%;全球冰川体积将减少15%—85%;北半球春季积雪范围将减少7%—25%;北半球高纬度地区近地表(上层3.5 m)多年冻土范围将减少37%—81%。

3 中国冰冻圈变化

中国冰冻圈主要由冰川、冻土和积雪三大类组成。中国现有冰川46377条,总面积为59425 km^2,冰储量达到5600 km^3(施雅风,2005);冻土面积占国土面积的70%以上,其中多年冻土面积占23%,季节冻土面积约占50%(周幼吾等,2000);中国

90%以上的地区有降雪,其中稳定积雪区(积雪日数超过 60 d)面积为 3.4×10^6 km^2,非稳定积雪面积为 4.8×10^6 km^2(车涛等,2005)。

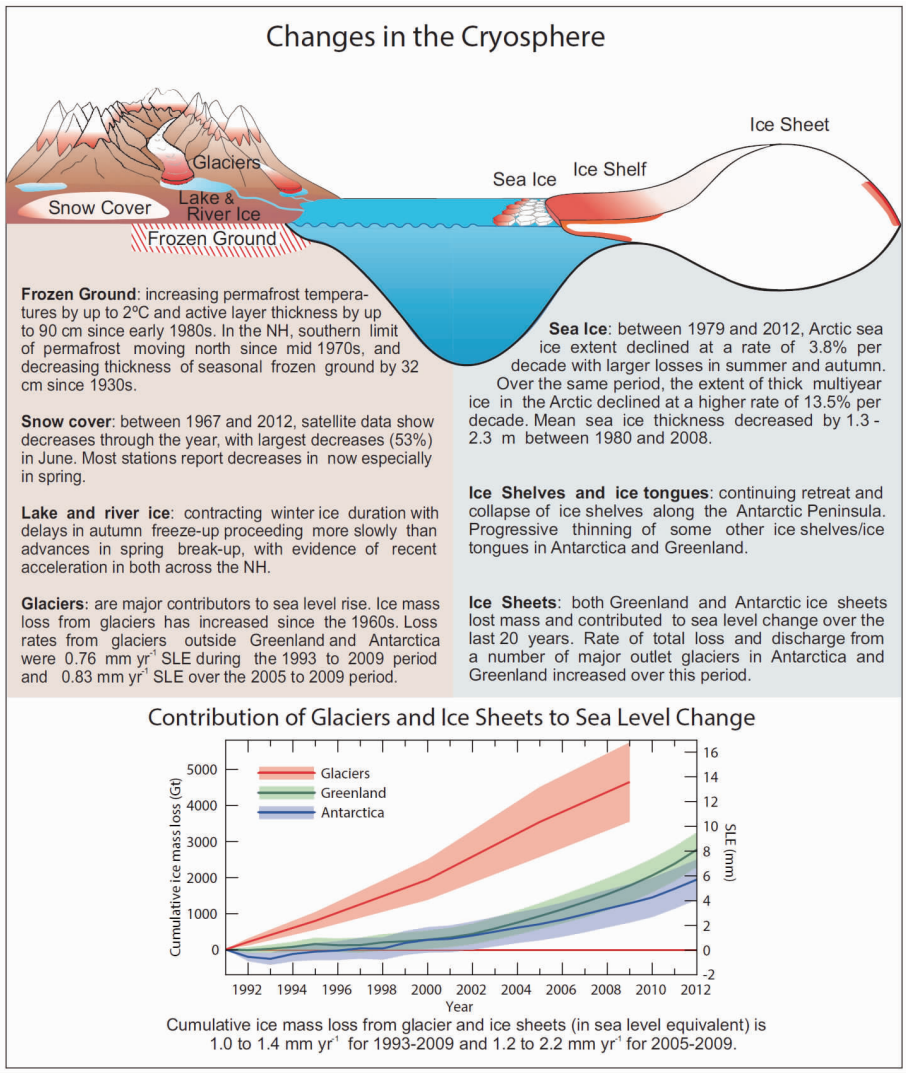


图 1 观测到的冰冻圈变化综合图(IPCC,2013)

Fig. 1 Schematic summary of the most prominent changes in the observed cryosphere (IPCC, 2013)

与全球变化一致,在气候变暖背景下,中国大部分山地冰川普遍退缩。20 世纪 60 年代以来,约 82%的冰川处于退缩和消失状态,面积退缩量在 10%以上,90 年代以来退缩加速(第二次气候变化国家评估报告编写委员会,2011)。例如,喜马拉雅山中段的珠穆朗玛峰绒布冰川末端在 1966—1997 年的退缩速度为 5—8 m/a,1997 年以后加快到 7—9 m/a。天山乌鲁木齐河源 1 号冰川在 1981—2001 年的退缩速率为 0.18 m/a,到 2001—2006 年增至 0.62 m/a(图 2)。

过去几十年来,以青藏高原为主体的多年冻土发生了显著变化,主要表现在两方面:一是冻土温度普遍上升,例如,分布于青藏高原中低山区的冻土温度普遍由过去的 -3℃上升至 -3—-1℃,河谷、盆地间的冻土温度已达到 -1—-0.5℃,连续多年冻土上部升温率达到 0.1℃/a。二是冻土直接退化。对于冻土温度较低的多年冻土(冻土温度低于 -3℃),以升温为主;对于高温多年冻土(高于

-1℃),则以退化为主。例如,自1975年以来,青藏高原多年冻土北界西大滩附近的多年冻土面积减小12%,南界附近安多—两道河公路两侧2 km范围内多年冻土面积缩小35.6%。季节冻土厚度总体上呈减小趋势,其中青藏高原绝大部分地区呈减薄趋势。1961—2006年,青藏高原地区季节最大冻结深度平均以3.3 mm/a的速度减薄(第二次气候变化国家评估报告编写委员会,2011)。

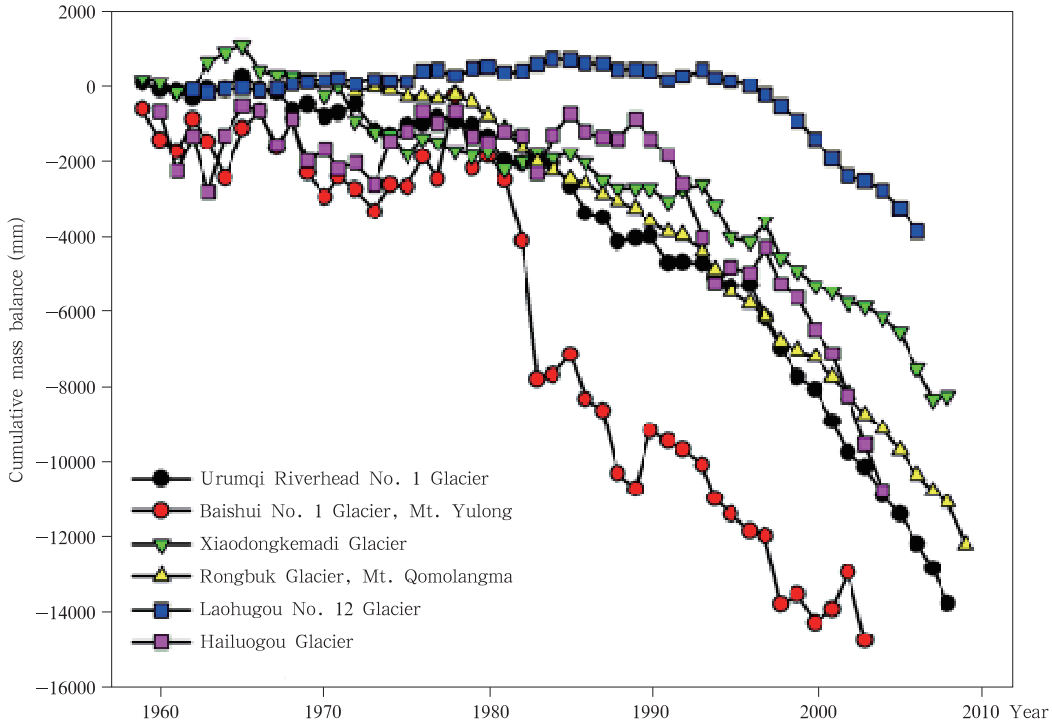


图2 近几十年来中国某些冰川物质平衡变化(秦大河等,2012)

Fig. 2 Changes in the mass balance of selected glaciers over recent decades (Qin, et al, 2012)

20世纪后半叶以来,青藏高原积雪深度稳定增加,但21世纪前期又大幅减少。1961年以来,新疆北部最大积雪深度显著增加,平均年增长0.8%,东北—内蒙古地区积雪深度虽无明显变化,但20世纪90年代以来波动振幅加大(第二次气候变化国家评估报告编写委员会,2011)。

根据对未来气候变暖的预估,未来几十年中国冰冻圈各组分将呈继续减小的趋势。其中,规模较小的冰川和海洋型冰川退缩量较大;多年冻土活动层厚度将继续增大,季节冻土面积和厚度将进一步减小;积雪变化有较大的区域差异(秦大河等,2012;姚檀栋等,2013)。

4 冰冻圈变化对中国气候的影响

4.1 积 雪

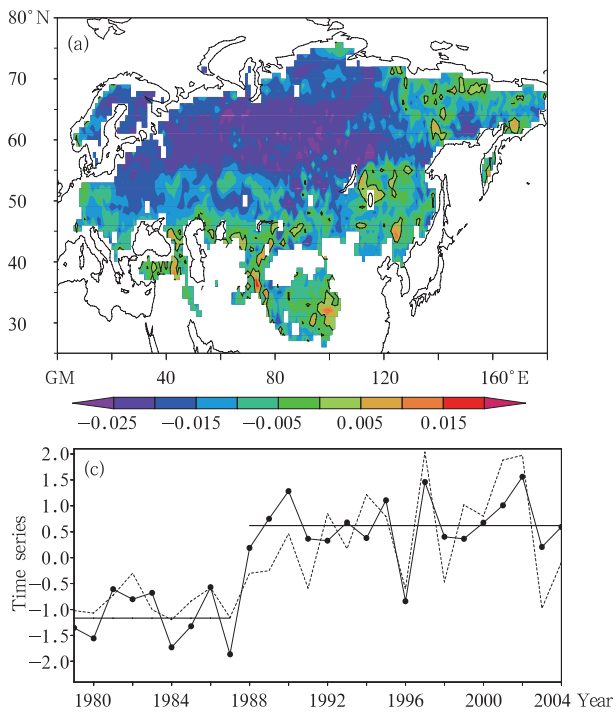
积雪是大气环流的产物,其变化又可通过改变地表能量平衡、水循环以及大气环流等反过来影响气候,在地球气候系统中扮演着极为重要的角色。早在100多年前,Blanford(1884)和Walker(1910)等就提出青藏高原冬季积雪与印度夏季风降水存在着反位相变化关系,这种关系也被后来的一些研究所证实(Hahn, et al, 1976; Dey, et al, 1983; Dickson 1984; Parthasarathy, et al, 1995)。

中国学者在青藏高原积雪对东亚夏季风和降水的影响方面开展了大量研究。由于采用不同的积雪资料和研究时段,所得结果亦不尽相同,但大部分研究(郭其蕴等,1986;陈丽娟等,1996;范广洲等,1997;陈乾金等,2000;郑益群等,2000;张顺利等,2001;Qian, et al,2003;Wu, et al, 2003;Zhao, et al,2007)认为,冬、春季青藏高原积雪与东亚夏季风成负相关关系。当青藏高原冬、春季积雪异常偏多时,东亚夏季风环流减弱或来得迟;而当青藏高原冬

春季积雪异常偏少时,东亚夏季风环流则增强或爆发早。青藏高原积雪影响东亚季风的主要机理在于:偏多的冬、春季高原积雪通过提高地表反射率减少太阳入射,减少冬、春季高原地表向大气的感热和潜热输送,从而减弱高原冬、春季的热源作用;积雪融化时融雪吸收热量;而积雪融化后,积雪融水使土壤成为"湿土壤",这种"湿土壤"使得高原积雪异常信息长期保留,从而与大气发生长时间的相互作用。

青藏高原积雪最显著的气候效应是通过季风影响中国夏季降水。总体来讲,青藏高原积雪异常对中国夏季降水的影响主要包括:(1)冬、春季高原积雪与夏季(6—8月)长江流域降水为正相关,与华南和华北降水为负相关(陈兴芳等,2000a;郑益群等,2000;吴统文等,2000;Chen, et al, 2000;Wu, et al,2003);(2)冬、春季高原积雪与初夏(5—6月)华南降水成正相关,与长江流域降水成负相关(陈烈庭,1998;韦志刚等,1998;蔡学湛,2001;Zhao, et al, 2007);(3)高原冬、春季积雪的年代际变化造成中国东部夏季雨型变化。20世纪70年代至90年代青藏高原冬、春季积雪偏多(朱玉祥等,2007;Ding, et al, 2009;宋燕等,2011),导致夏季风偏弱(Zhang, et al, 2004),中国出现"南涝北旱"分布型(朱玉祥等,2007;Zhao, et al, 2007;Ding, et al, 2009)。

相对而言,对欧亚积雪影响中国气候的研究较少。但近年来,欧亚积雪与中国气候的关系逐渐成为研究热点。研究揭示,冬、春季欧亚积雪与夏季中国东北和华北东部以及西南地区降水存在同位相变化关系(陈兴芳等,2000b;陈海山等,2003),与江淮流域为反位相变化关系(刘晓东等,1990)。Yang等(1994)认为,欧亚大陆冬季积雪与中国华南和华北地区的夏季降水为显著正相关,与中国西部、中部和东北部地区的夏季降水为负相关。Ye等(2005)指出,中国东部夏季降水与秋季欧亚积雪成反位相变化关系。此外,中国东部夏季雨型的年代际变化与欧亚大陆春季积雪的年代际变化也关系密切。20世纪80年代末以后,伴随着欧亚春季积雪的减少,中国南方夏季降水明显增多(张人禾等,2008;Zhang et al, 2013)。Wu等(2009a)的研究进一步揭示,20世纪70至90年代,欧亚大陆积雪分布的主导模态是大部分地区偏少,东亚和高原部分偏多,这种形势有利于在较高纬度激发大气中遥相关波列,造成华北为异常高压控制,华南为异常低压控制,对应中国南部和东南部降水偏多,而黄河上游地区降水偏少(图3)。因此,20世纪后20多年欧亚大陆积雪的减少和青藏高原积雪的增多均与南涝北旱格局的形成密切相关。



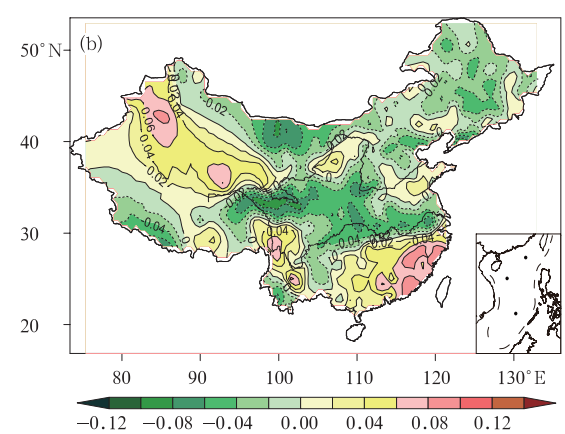


图3 1979—2004年春季欧亚大陆平均积雪水当量与后期中国台站夏季降水量奇异值分解的第一耦合模态的标准化时空分布特征
(a. 春季欧亚大陆积雪水当量, b. 后期夏季中国台站降水量, c. 春季欧亚大陆积雪水当量(实线)和夏季台站降水量(虚线)第一耦合模态时间序列;Wu, et al, 2009a)

Fig. 3 Spatial distributions of the leading singular value decomposition modes of (a) springtime Eurasian snow water equivalent (SWE) and (b) summertime rainfall at stations in China and (c) normalized time series of spring Eurasian SWE (solid line) and summer rainfall in China (dashed line) (Wu, et al, 2009a)

春季欧亚积雪变化对中国春季降水的影响同样显著。Wu 等(2007)的研究揭示,春季西伯利亚西部积雪与中国南部降水成正相关。Zuo 等(2012a,2012b)指出,春季欧亚大陆积雪偏多时,中国东南地区降水偏多,西南地区降水偏少,反之亦然。自20世纪80年代末以来春季欧亚积雪明显减少是造成中国东南地区降水减少和西南地区降水增多的一个重要原因。

此外,穆松宁等(2010,2012)还研究了冬季新增积雪变化对中国夏季温度的影响,结果表明,当冬季欧亚北部新增积雪面积偏大时,夏季东亚中纬度地区易盛行异常冷低压,内蒙古东部和东北西部易出现凉夏,同时,东亚副热带西风急流增强,西太平洋副热带高压易加强且西伸和北扩,江南地区在副热带高压的控制下易干热;反之亦然。

4.2 海 冰

极地位于地球南北两端,是多个国际科学计划研究全球气候变化的关键区,在全球和区域气候变化中起重要的作用。极地大气环境变化,特别是极地冷暖和冰雪状况的变化对东亚大气环流和中国气候变化的影响一直是气象学者研究的重点之一。

北极是气候变化显著区,受气候变暖影响,北极冰雪减少,造成生态系统和气候发生快速变化,因而备受关注(Committee on Emerging Research Questions in Arctic, 2014)。北极海冰变化可影响大气和海洋的热量输送以及海-气的热通量交换。近几十年北冰洋秋、冬季变暖与北极海冰的减少密切相关(Serreze, et al, 2011)。研究还揭示,冬季喀拉海、巴伦支海、格陵兰海海冰变化与北半球副热带高压、ENSO事件、东亚冬季风以及中国气候年际和年代际变化密切相关(方之芳,1986;Huang, et al, 1992; Fang, et al, 1994; 杨修群等,1994;Wu, et al, 1997; 武炳义等, 1999,2000,2004)。

Wu 等(2011)指出,秋至冬季北冰洋东部、欧亚大陆北部边缘海区海冰密集度与冬季西伯利亚高压强度成显著的负相关,并认为北冰洋东部、格陵兰海—巴伦支海—喀拉海附近持续性的秋冬季海冰异常偏多及同期负的海温异常(特别是北大西洋北部),导致冬季欧亚大陆北部和北大西洋北部海平面气压降低,致使冬季西伯利亚高压减弱并加强欧亚大陆中高纬度地区的西风。同时,秋冬季海冰偏多导致北极出现气温负异常,从而加强北极与欧亚大陆中高纬度的大气热力梯度,欧亚大陆北部的西风得以增强。加强的西风阻碍冷空气从高纬度地区向南爆发,进而造成欧亚大陆中高纬度和东亚地表温度偏高,反之亦然。近年来欧亚大陆严冬频发与秋冬季北极海冰减少有密切联系(Honda, et al, 2009; Petoukhov, et al, 2010,Liu, et al, 2012b)。

北极海冰变化不仅影响冬季的气候变化,而且对冬季欧亚大陆的盛行天气型,以及极端天气型的强度和频率均有影响(Wu, et al,2013a)。自20世纪80年代后期以来,秋季北极海冰持续减少致使冬季欧亚大陆北部阻塞型环流异常活动频繁,有利于冬季亚洲大陆中、北部地区气温呈现降温趋势(图4)。Liu 等(2012a)的研究也揭示,秋季北极海冰面积的缩小对北半球中高纬度陆地区域冬季极端温度和降雪事件具有重要影响。夏季北极海冰的大范围减少以及秋冬季北极海冰的延迟恢复可以引起不同于北极涛动的冬季大气环流异常,使西风急流变得更具波浪状,导致中高纬度阻塞形势出现的频率增加。此外,夏季北极海冰的大范围减少以及秋冬季北极海冰的延迟恢复使得北极存在更多的开阔水,从而将大量的局地水汽从海洋传输给大气,而且北极的变暖也使得大气可以容纳更多的水汽。

冬季北极海冰还可以通过北大西洋海温影响后期夏季欧亚大陆的大气环流和气候(Wu, et al, 2013b)。春季北极海冰变化也与中国夏季降水关系密切。春季北极海冰偏少时,中国东北和江淮流域夏季降水增多,华南降水减少。北极偶极子可能是春季北极海冰与夏季中国降水联系的桥梁(Wu, et al, 2009b, 2009c)。Zhao 等(2004)揭示,春季白令海和鄂霍次克海海冰减少,不利于东亚夏季风向北移动,从而造成中国东南区域夏季降水增多。白令海和鄂霍次克海海冰变化还可通过影响热带大气环流进而影响西北太平洋台风生成频次的变化(范可,2007;Zhou, et al, 2008a,2008b)。冬春季北太平洋海冰面积偏大时,西北太平洋台风生成频次减少。

南极海冰变化不仅影响南半球大气环流(包括南极涛动、马斯克林高压和澳大利亚高压)的异常(高辉等,2003;Xue, et al, 2004),而且还可越过赤道影响东亚夏季风和气候(符淙斌,1981;杨修群等,1992;Xue, et al, 2003;马丽娟等,2006,2007)。南极海冰面积与长江流域梅雨成显著负相关(符淙斌,

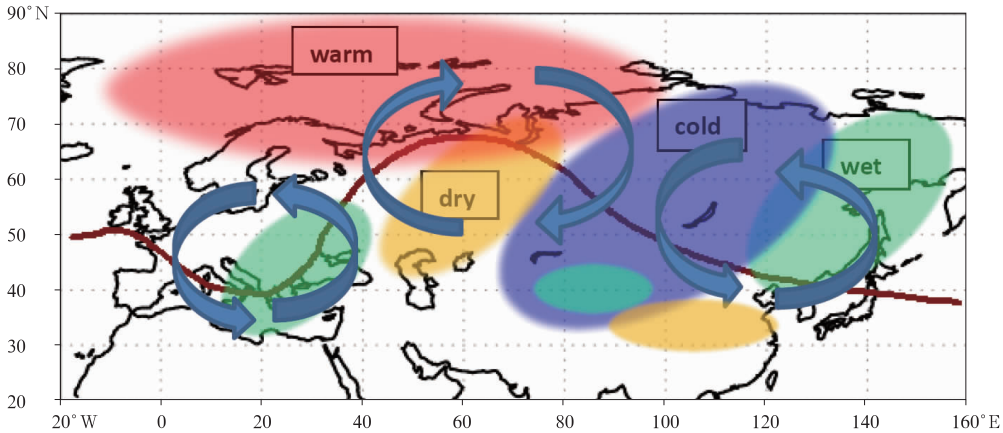


图 4 北极海冰消融如何影响欧亚大陆冬季表面气温和降水的示意图

(箭头表示在对流层低层与冬季三极子风场负位相对应的异常气旋和反气旋空间分布;褐色线表示冬季 500 hPa 等位势高度线,黄色和绿色区域分别代表冬季降水偏少和偏多,红色和紫色区域分别表示正、负表面气温异常;Wu,et al, 2013a)

Fig. 4 Schematic diagram illustrating how reduced Arctic sea ice affects winter surface air temperature (SAT) and precipitation in Eurasia

(Arrows show the typical locations of anomalous anticyclonic and cyclonic circulations in the lower troposphere associated with the negative phase of the tripole wind pattern; the brown line represents an isoline of geopotential height at 500 hPa; the yellow and green areas indicate decreases and increases in precipitation, espectively, while the red and purple areas indicate positive and negative SAT anomalies; Wu, et al, 2013a)

1981),如果上年海冰面积缩小,来年则出梅晚、梅期长;反之,则出梅早、梅期短。Xue 等(2003)揭示,当北半球春、夏季南极海冰增多时,夏季华北降水增多而华南和东北降水减少,此种雨型分布与南极海冰变化引起的东亚夏季风环流变化有关。南极海冰也与极涡指数、赤道海温、西太平洋副热带高压及台风活动有关(赵汉光等,1989;彭公炳等,1989;卞林根等,1996)。

4.3 冻 土

在全球变化背景下,冻土与全球气候的相互作用受到越来越多的关注(Zhang, et al, 1999; 秦大河等,2009)。虽然有关冻土与气候相互作用的研究开始较早,但由于冻土水热过程的复杂性,研究工作主要集中在气候变化对冻土的影响方面(金会军等,2002; Cheng, et al, 2007; Wu, et al, 2008; Zhao, et al, 2010; Guo, et al, 2013),而冻土变化对区域气候,特别是对中国气候影响的研究还相对较少。

已有的研究(李述训等,2002;Tanaka, et al, 2003;Guo, et al, 2011a, 2011b)揭示了青藏高原冻土变化在高原地表热通量变化中的重要作用。高原土壤的冻融作用可加强地气系统的热交换,对青藏高原上空及东亚大气环流(南亚高压、西太平洋副热带高压、印度低压等)有显著的影响。青藏高原季节冻融过程引起的水热变化是影响东亚气候的一个重要外源(王澄海等,2003),对中国东部地区降水特别是汛期降水有重要的指示意义。Gao 等(2005)指出,高原解冻早晚与长江中下游夏季降水多少成正相关关系。

陆-气耦合模式是研究陆地与大气相互作用的一个重要工具,为定量化研究冻土变化对全球和区域气候的影响提供了一个途径。目前在冻土参数化数值模拟研究方面取得一定进展。一些工作通过替换或改进冻土参数化方案,研究了青藏高原冻土冻融过程对东亚大气环流和区域气候的影响(王澄海等,2002;张宇等,2003;Wang, et al, 2008;李震坤等,2011;Xin, et al, 2012)。例如,Wang 等(2008)在 CCM3 模式中加入新的冻土参数化方案后,发现模式模拟的长江流域夏季平均降水极大值与观测资料更吻合,对东亚大气环流以及青藏高原风场等要素的模拟能力也有很大提高。李震坤等(2011)在改进 CAM3 模式中加入土壤冻融过程参数化方案后,发现模式模拟的青藏高原地-气的加热作用显著增强。东亚气候对冻土过程参数化方案也非常敏感,改进参数化方案后,冬、夏季地表气温都有显著的变

化。Xin 等(2012)通过在 CAM3 模式中引入未冻水过程,分析了东亚季风气候对冻土变化的响应,发现模拟的东亚冬季风减弱,东亚夏季风增强,青藏高原南部、长江流域中部以及东北地区夏季降水偏多,华南、海南岛地区夏季降水偏少。这些研究从数值模拟角度揭示出冻土变化对东亚气候的重要影响。

4.4 冰 川

冰川是中国西北干旱区的重要水资源,出山口径流的变化与流域内冰川面积大小及其变化密切相关。冰川对中国水资源的影响主要有两方面的作用,一是水资源补给作用,二是对河流径流的削峰补缺调节作用。冰川对河流的调节作用主要表现在:丰水年由于流域降水偏多,分布在极高山区的冰川区气温往往偏低,冰川消融量减少,冰川融水对河流补给量下降,削弱降水偏多引起的流域径流增大幅度;反之,当流域降水量偏少时,冰川区相对偏高的气温导致冰川融水增加,弥补降水不足对河流的补给量(丁永建等,2009;第二次气候变化国家评估报告编写委员会,2011)。流域内冰川规模和冰川覆盖率等决定了冰川径流的年际和年代际波动。当流域冰川覆盖率超过 5%时,冰川融水就会对河川径流产生显著影响(Ye, et al, 2003)。近十几年乌鲁木齐河源区径流增加的 70%来自于冰川加速消融补给,南疆阿克苏径流增加的 1/3 左右来源于冰川径流增加(刘时银等,2006)。长江源区直门达水文站测得的近 40 年河川径流减少 14%,而直门达以上流域内冰川融水同期则增加了 15%(Liu, et al, 2009)。这些冰川消融导致的江河水量的增加在目前总体上是有利的,但是,值得注意的是,冰川的加速萎缩最终将会造成河川径流的迅速减少。山区积雪和冻土对径流变化也有重要影响,积雪和冻土对径流年内过程影响可使河流年内分配发生改变(第二次气候变化国家评估报告编写委员会,2011)。

5 结 语

作为地球气候系统五大圈层之一,冰冻圈是全球变化最快速、最显著的指示器,也是对气候系统影响最直接和最敏感的圈层,在地球气候系统中占据举足轻重的地位。文中介绍了有关全球和中国冰冻圈变化的最新研究结论,并着眼于冰冻圈气候效应,论述了青藏高原积雪、欧亚积雪、北极海冰、南极海冰以及中国冻土和冰川变化等对东亚大气环流和中国气候影响的研究进展。

冰冻圈除气候效应外,还具有显著的生态效应、环境效应、资源效应等。受气候变化的影响,冰冻圈变化的气候效应、生态效应、环境效应和资源效应等在中国日趋显著,对区域气候、水资源、生态与环境以及可持续发展产生了重大影响。而且,中国冰冻圈直接影响区均是生态脆弱区,也是中国经济落后区,未来经济发展面临的生态与环境压力受冰冻圈变化的影响会更加凸出。另外,从国际学科发展来看,冰冻圈研究正在由过去单要素自身机理和过程研究向冰冻圈科学体系化方向迈进。“气候和冰冻圈(CliC)计划”将冰冻圈各要素与气候、水文、生态和环境等的相互作用纳入同一系统中进行集成研究,其目标是提高对冰冻圈与气候系统相互作用的物理过程与反馈机制的理解;提高模型对冰冻圈过程的描述能力,减少气候模拟和气候变化预测的不确定性;评估和量化过去和未来气候变化所导致的冰冻圈各分量的变化及其影响等。可见,冰冻圈科学向机理和影响两方面研究拓展,是冰冻圈科学未来研究的重点。

因此,围绕国际科学前沿和国家需求,中国冰冻圈科学研究应集中于冰冻圈变化机理、冰冻圈与气候相互作用、冰冻圈变化的影响和适应对策等方面,开展跨学科、跨部门的综合集成研究,构建完整的冰冻圈科学体系。冰冻圈变化机理是冰冻圈科学研究的基础领域,冰冻圈与气候相互作用是当前着力加强的重点,冰冻圈变化的影响日益受到关注,但研究基础还比较薄弱,冰冻圈变化影响的适应机制尚处在萌芽状态(丁永建等,2013)。所以,未来需要:(1)进一步深化基础研究,科学认识冰冻圈过程及其对气候变化的响应机理,特别是冰川变化与气候变化的定量关系、冻土与积雪变化对气候变化的响应机理;深入研究冰冻圈和气候相互作用的物理过程与反馈机制,提高气候系统模式对冰冻圈过程的耦合模拟能力,定量评估冰冻圈在全球和区域气候变化中的作用;(2)加强冰冻圈变化的影响研究,特别是不同冰冻圈变化对气候、水资源和生态的影响以及内在物理机制;(3)重视冰冻圈变化的适应对策研究,针对冰冻圈变化的特点,综合考虑自然、社会、经济和人文因素,提出适合中国冰冻圈作用区特点的科学评价指标,构建中国冰冻圈变化的脆弱性评价体系,提出应对中国冰冻圈变化的适应性途径和对

策,为人类可持续发展提供科学支撑。

参考文献

卞林根,陆龙骅,贾朋群. 1996. 南极海冰和极涡指数的时空特征及相互关系. 地理学报,51(1):33-43

蔡学湛. 2001. 青藏高原雪盖与东亚季风异常对华南前汛期降水的影响. 应用气象学报,12(3):358-367

车涛,李新. 2005. 1993—2002 年中国积雪水资源时空分布与变化特征. 冰川冻土,27(1):64-67

陈海山,孙照渤. 2003. 欧亚积雪异常分布对冬季大气环流的影响 I:观测研究. 大气科学,27(3):304-316

陈丽娟,吕世华,罗四维. 1996. 青藏高原春季积雪异常对亚洲季风降水影响的数值试验. 高原气象,15(1):122-130

陈烈庭. 1998. 青藏高原冬春季异常雪盖与江南前汛期降水关系的检验和应用. 应用气象学报,9(增刊):1-8

陈乾金,高波,张强. 2000. 青藏高原冬季雪盖异常与冬夏季风变异及其相互联系的物理诊断研究. 大气科学,24(4):477-492

陈兴芳,宋文玲. 2000a. 冬季高原积雪和欧亚积雪对我国夏季旱涝不同影响关系的环流特征分析. 大气科学,24(5):585-592

陈兴芳,宋文玲. 2000b. 欧亚和青藏高原冬春季积雪与我国夏季降水关系的分析和预测应用. 高原气象,19(2):214-223

第二次气候变化国家评估报告编写委员会. 2011. 第二次气候变化国家评估报告. 北京:科学出版社,79-95

丁永建,秦大河. 2009. 冰冻圈变化与全球变暖:我国面临的影响与挑战. 中国基础科学,11(3):4-11

丁永建,效存德. 2013. 冰冻圈变化及其影响研究的主要科学问题概论. 地球科学进展,28(10):1067-1076

范广洲,罗四维,吕世华. 1997. 青藏高原冬季积雪异常对东、南亚夏季风影响的初步数值模拟研究. 高原气象,16(2):140-152

范可. 2007. 北太平洋海冰,一个西北太平洋台风生成频次的预测因子? 中国科学(D 辑),37(6):851-856

方之芳. 1986. 北半球副热带高压与北极海冰的相互作用. 科学通报,31(4):286-289

符淙斌. 1981. 我国长江流域梅雨变动与南极冰雪状况的可能联系. 科学通报,26(8):484-486

高辉,薛峰,王会军. 2003. 南极涛动年际变化对江淮梅雨的影响及预报意义. 科学通报,48(增刊 2):87-92

郭其蕴,王继琴. 1986. 青藏高原的积雪及其对东亚季风的影响. 高原气象,5(2):116-124

金会军,李述训,王绍令等. 2002. 气候变化对中国多年冻土和寒区环境的影响. 地理学报,55(2):151-173

李述训,南卓铜,赵林. 2002. 冻融作用对地气系统能量交换的影响分析. 冰川冻土,24(5):506-511

李震坤,朱伟军,武炳义. 2011. 大气环流模式 CAM 中土壤冻融过程改进对东亚气候模拟的影响. 大气科学,35:683-693

刘时银,丁永建,张勇等. 2006. 塔里木河流域冰川变化及其对水资源影响. 地理学报,61(5):482-490

刘晓东,罗四维. 1990. 亚欧大陆北部与青藏高原雪盖特征及其与我国气温和降水的统计分析. 高原气象,9(3):320-326

马丽娟,陆龙骅,卞林根. 2006. 南极海冰与我国夏季天气的关系. 极地研究,18(1):30-37

马丽娟,陆龙骅,卞林根. 2007. 南极海冰北界涛动指数及其与我国夏季天气气候的关系. 应用气象学报,18(4):568-572

穆松宁,周广庆. 2010. 冬季欧亚大陆北部新增雪盖面积变化与中国夏季气候异常的关系. 大气科学,34(1):213-226

穆松宁,周广庆. 2012. 欧亚北部冬季增雪“影响”我国夏季气候异常的机理研究:陆面季节演变异常的“纽带”作用. 大气科学,36(2):297-315

彭公炳,王宝贯. 1989. 南极海冰对西北太平洋副热带高压的影响及其海洋大气环流背景. 科学通报,34(1):56-58

秦大河,效存德,丁永健等. 2006. 国际冰冻圈研究动态和我国冰冻圈研究的现状与展望. 应用气象学报,17(6):650-656

秦大河,丁永健. 2009. 冰冻圈变化及其影响研究-现状、趋势及关键问题. 气候变化研究进展,5(4):187-195

秦大河,董文杰,罗勇. 2012. 中国气候与环境演变:第一卷. 北京:气象出版社,114-155

施雅风. 2005. 中国冰川与环境:现在、过去和未来. 北京:科学出版社,1-410

宋燕,张菁,李智才等. 2011. 青藏高原冬季积雪年代际变化及对中国夏季降水的影响. 高原气象,30(4):843-851

王澄海,董文杰,韦志刚. 2002. 陆面模式中土壤冻融过程参数化研究进展. 地球科学进展,17(1):44-52

王澄海,董文杰,韦志刚. 2003. 青藏高原季节冻融过程与东亚大气环流关系的研究. 地球物理学报,46(3):309-316

韦志刚,罗四维,董文杰等. 1998. 青藏高原积雪资料分析及其与我国夏季降水的关系. 应用气象学报,9(增刊):39-46

武炳义,黄荣辉,高登义. 1999. 冬季北极喀拉海、巴伦支海海冰面积变化对东亚冬季风的影响. 大气科学,23(3):267-275

武炳义,黄荣辉,高登义. 2000. 与北大西洋接壤的北极海冰和年际气候变化. 科学通报,45(18):1993-1998

武炳义,卞林根,张人禾. 2004. 冬季北极涛动和北极海冰变化对东亚气候变化的影响. 极地研究,16(3):211-220

吴统文,钱正安. 2000. 青藏高原冬春积雪异常与我国东部地区夏季降水关系的进一步分析. 气象学报,58(5):570-581

效存德. 2008. 南极地区气候系统变化:过去、现在和将来. 气候变化研究进展,4(1):1-7

杨修群,黄士松. 1992. 北半球夏季南极冰气候效应的数值试验. 大气科学,16(1):67-76

杨修群,谢倩,黄士松. 1994. 北极冰异常对亚洲夏季风影响的数值模拟. 海洋学报,16(5):34-40

姚檀栋,秦大河,沈永平等. 2013. 青藏高原冰冻圈变化及其对区域水循环和生态条件的影响. 自然杂志,35(3):179-186

张人禾,武炳义,赵平等. 2008. 中国东部夏季气候 20 世纪 80 年代后期的年代际转型及其可能成因. 气象学报,66(5):697-706

张顺利,陶诗言. 2001. 青藏高原积雪对亚洲夏季风影响的诊断及数值研究. 大气科学,25(3):372-390

张宇,宋敏红,吕世华等. 2003. 冻土过程参数化方案与中尺度大气模式的耦合. 冰川冻土,25(5):541-546

赵汉光,姬菊枝. 1989. 南极极冰的时空变化特征及其对大气环流

的影响. 气象, 15(2): 3-8

郑益群, 钱永甫, 苗曼倩等. 2000. 青藏高原积雪对中国夏季风气候的影响. 大气科学, 24(6): 761-774

周幼吾, 郭东信, 邱国庆等. 2000. 中国冻土. 北京: 科学出版社, 450pp

朱玉祥, 丁一汇, 徐怀刚. 2007. 青藏高原大气热源和冬春积雪与中国东部降水的年代际变化关系. 气象学报, 65(6): 946-958

Allison I, Barry R G, Goodison B. 2001. Climate and Cryosphere (CliC) Project. Science and Co-ordination Plan Version 1. WCRP-114, WMO/TD No. 1053

Blanford H F. 1884. On the connection of Himalayan snowfall and seasons of drought in India. Proc Roy Soc London, 37: 3-22

Cazenave A, Lombard A, Llovel W. 2008. Present-day sea level rise: A synthesis. C R Geosci, 340(11): 761-770

Cazenave A, Dominh K, Guinehut S, et al. 2009. Sea level budget over 2003-2008: A reevaluation from GRACE space gravimetry, satellite altimetry and Argo. Glob Planet Change, 65(1-2): 83-88

Chen L T, Wu R G. 2000. Interannual and decadal variations of snow cover over Qinghai-Xizang Plateau and their relationships to summer monsoon rainfall in China. Adv Atmos Sci, 17(1): 18-30

Cheng G, Wu T. 2007. Responses of permafrost to climate change and their environmental significance, Qinghai-Tibet Plateau. J Geophys Res, 112: F02S03, doi:10.1029/2006JF000631

Committee on Emerging Research Questions in the Arctic. 2014. The Arctic in the Anthropocene: Emerging Research Questions. Washington DC: The National Academies Press, 1-220

Dey B, Kumar O B. 1983. Himalayan winter snow cover area and summer monsoon rainfall over India. J Geophys Res, 88(C9): 5471-5474

Dickson R R. 1984. Eurasian snowcover versus Indian monsoon rainfall-An extension of the Hanh-Shukla results. J Climate Appl Meteor, 23(1): 171-173

Ding Y H, Sun Y, Wang Z Y, et al. 2009. Inter-decadal variation of the summer precipitation in China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part Ⅱ: Possible causes. Int J Climatol, 29(13): 1926-1944

Fang Z F, Wallace J M. 1994. Arctic sea ice variability on a timescale of weeks and its relation to atmospheric forcing. J Climate, 7(12): 1897-1914

Gao R, Wei Z G, Dong W J, et al. 2005. Impact of the anomalous thawing in the Tibetan Plateau on summer precipitation in China and its mechanism. Adv Atmos Sci, 22(2): 238-245

Guo D L, Yang M X, Wang H J. 2011a. Characteristics of land surface heat and water exchange under different soil freeze/thaw conditions over the central Tibetan Plateau. Hydrol Proc, 25(16): 2531-2541

Guo D L, Yang M X, Wang H J. 2011b. Sensible and latent heat flux response to diurnal variation in soil surface temperature and moisture under different freeze/thaw soil conditions in the seasonal frozen soil region of the central Tibetan Plateau. Environ Earth Sci, 63(1): 97-107

Guo D L, Wang H J. 2013. Simulation of permafrost and seasonally frozen ground conditions on the Tibetan Plateau, 1981-2010. J Geophys Res, 118: 5216-5230, doi:10.1002/jgrd.50457

Hahn D J, Shukla J. 1976. An apparent relationship between Eurasian snow cover and Indian Monsoon rainfall. J Atmos Sci, 33(12): 2461-2462

Honda M, Inous J, Yamane S. 2009. Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters. Geophys Res Lett, 36(8): L08707, doi:10.1029/2008GL037079

Huang S S, Yang X Q, Xie Q. 1992. The effects of the Arctic sea ice on the variations of atmospheric circulation and climate. Acta Meteor Sinica, 6(1): 1-14

IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press

IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1535pp

Liu J P, Curry J A, Wang H J, et al. 2012a. Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall. Proc Natl Acad Sci USA, 109(11): 4074-4079

Liu N, Liu J P, Zhang Z H, et al. 2012b. Is extreme Arctic sea ice anomaly in 2007 a key contributor to severe January 2008 snowstorm in China? Int J Climatol, 32(13): 2081-2087

Liu S Y, Zhang Y, Zhang Y S, et al. 2009. Estimation of glacier runoff and future trends in the Yangtze River source region, China. J Glaciol, 55(190): 353-362

Parthasarathy B, Yang S. 1995. Relationships between regional Indian summer monsoon rainfall and Eurasian snow cover. Adv Atmos Sci, 12(2): 143-150

Petoukhov V, Semenov V A. 2010. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents. J Geophys Res, 115: D21111, doi:10.1029/2009JD013568

Qian Y F, Zheng Y, Zhang Y, et al. 2003. Responses of China's summer monsoon climate to snow anomaly over the Tibetan Plateau. Int J Climatol, 23(6): 593-613

Serreze M C, Barry R G. 2011. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. Glob Planet Change, 77(1-2): 85-96

Tanaka K, Tamagawa I, Ishikawa H, et al. 2003. Surface energy budget and closure of the eastern Tibetan Plateau during the GAME-Tibet IOP 1998. J Hydrol, 283(1-4): 169-183

Walker G T. 1910. Correlation in seasonal variations of weather II.

Memo India Meteor Dept, 21: 22-45

Wang C H, Cheng G D, Deng A, et al. 2008. Numerical simulation on climate effects of freezing-thawing processes using CCM3. Sciences in Cold and Arid Regions, Initial Issue, 68-79

Wu B Y, Gao D Y, Huang R H. 1997. ENSO events and interannual variations of winter sea-ice in the Greenland, the Kara and the Barents Seas. Chin Sci Bull, 42(16): 1382-1384

Wu B Y, Yang K, Zhang R H. 2009a. Eurasian snow cover variability and its association with summer rainfall in China. Adv Atmos Sci, 26(1): 31-44

Wu B Y, Zhang R H, Wang B, et al. 2009b. On the association between spring Arctic sea ice concentration and Chinese summer rainfall. Geophys Res Lett, 36: L09501, doi: 10.1029/2009GL037299

Wu B Y, Zhang R H, Wang B. 2009c. On the association between spring Arctic sea ice concentration and Chinese summer rainfall: A further study. Adv Atmos Sci, 26(4): 666-678

Wu B Y, Su J Z, Zhang R H. 2011. Effects of autumn-winter Arctic sea ice on winter Siberian High. Chin Sci Bull, 56(30): 3220-3228

Wu B Y, Handorf D, Dethloff K, et al. 2013a. Winter weather patterns over Northern Eurasia and Arctic sea ice loss. Mon Wea Rev, 141(11): 3786-3800

Wu B Y, Zhang R H, D'Arrigo R, et al. 2013b. On the relationship between winter sea ice and summer atmospheric circulation over Eurasia. J Climate, 26(15): 5523-5536

Wu Q B, Zhang T J. 2008. Recent permafrost warming on the Qinghai-Tibetan Plateau. J Geophys Res, 113: D13108, doi: 10.1029/2007JD009539

Wu R, Kirtman B P. 2007. Observed relationship of spring and summer East Asian rainfall with winter and spring Eurasian snow. J Climate, 20(7): 1285-1304

Wu T, Qian Z A. 2003. The relation between the Tibetan winter snow and the Asian summer monsoon and rainfall: An observational investigation. J Climate, 16(12): 2038-2051

Xin Y, Wu B, Bin L, et al. 2012. Response of the East Asian climate system to water and heat changes of global frozen soil using NCAR CAM model. Chin Sci Bull, 57(34): 4462-4471

Xue F, Guo P W, Yu Z H. 2003. Influence of interannual variability of Antarctic sea ice on summer rainfall in eastern China. Adv Atmos Sci, 20(1): 97-102

Xue F, Wang H J, He J H. 2004. Interannual variability of Mascarene high and Australian high and their influences on East Asian summer monsoon. J Meteor Soc Japan, 82(4): 1173-1182

Yang S, Xu L Z. 1994. Linkage between Eurasian winter snow cover and regional Chinese summer rainfall. Int J Climatol, 14(7): 739-750

Ye B S, Ding Y J, Liu F J, et al. 2003. Responses of various sized alpine glaciers and runoff to climate change. J Glaciol, 49(164): 1-7

Ye H C, Bao Z B. 2005. Eurasian snow conditions and summer monsoon rainfall over South and Southeast Asia-assessment and comparison. Adv Atmos Sci, 22(6): 877-888

Zhang T J, Barry R G, Knowles K, et al. 1999. Statistics and characteristics of permafrost and ground ice distribution in the Northern Hemisphere. Pol Geogr, 23(2): 147-169

Zhang Y S, Li T, Wang B. 2004. Decadal change of the spring snow depth over the Tibetan Plateau: The associated circulation and influence on the East Asian summer monsoon. J Climate, 17(14): 2780-2793

Zhang R H, Wu B Y, Han J P, et al. 2013. Effects on summer monsoon and rainfall change over China due to Eurasian snow cover and ocean thermal conditions // Bharat Raj Singh. Climate Change: Realities, Impacts over Ice Cap, Sea Level and Risks, 227-250

Zhao L, Wu Q, Marchenko S S, et al. 2010. Thermal state of permafrost and active layer in Central Asia during the International Polar Year. Perm Perigl Proce, 21(2): 198-207

Zhao P, Zhang X D, Zhou X J, et al. 2004. Sea-ice extent anomaly in the North Pacific and impact on the East Asian summer monsoon rainfall. J Climate, 17(17): 3434-3447

Zhao P, Zhou Z J, Liu J P. 2007. Variability of the Tibetan spring snow and its associations with the hemispheric extropical circulation and East Asian summer monsoon rainfall: An observational investigation. J Climate, 20(15): 3942-3955

Zhou B T, Cui X. 2008a. Hadley circulation signal in the tropical cyclone frequency over the western North Pacific. J Geophys Res, 113: D16107, doi:10.1029/2007JD009156

Zhou B T, W H J. 2008b. Relationship between Hadley circulation and sea ice extent in the Bering Sea. Chin Sci Bull, 53(3): 444-449

Zuo Z Y, Zhang R H, Wu B Y. 2012a. Inter-decadal variations of springtime rainfall over southern China mainland for 1979-2004 and its relationship with Eurasian snow. Sci China-Earth Sci, 55(2): 271-278

Zuo Z Y, Zhang R H, Wu B Y, et al. 2012b. Decadal variability in springtime snow over Eurasia: Relation with circulation and possible influence on springtime rainfall over China. Int J Climatol, 32(9): 1336-1345